

摆盘流动与换热性能数值仿真

杨志民^{1,2}, 贾 真³, 赵 煜², 张书华², 葛 新²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015;

3. 中国航空工业集团公司 空天发动机研究院有限公司, 北京 100083)

摘 要: 针对受燃烧室出口高温燃气冲刷的摆盘装置的冷却水回路,建立二维、三维物理仿真模型,模拟了冷却水在内部流道的流动与换热过程,考察了冷却水进口压力、冷却水流量对流阻和换热性能的影响。结果表明:①摆盘冷却水进口压力由 2.3×10^5 Pa 提高到 8.3×10^5 Pa,摆盘壁温变化微小,结构 1 壁温升高 5 K,结构 2 壁温升高 7 K;②冷却水进口速度由 0.5 m/s 提高到 5.3 m/s,结构 1 壁温降低约 120 K,结构 2 壁温降低约 100 K,冷却效果明显;③结构 2 通过缩小流道的流通面积,能在更小的冷却水流量的工况下得到更好的换热效果。

关 键 词: 燃烧室; 高温燃气; 摆盘; 流场结构; 换热性能

中图分类号: V231

文献标志码: A

Numerical simulation of flow and heat transfer performance in turntable

YANG Zhi-min^{1,2}, JIA Zhen³, ZHAO Yu²,
ZHANG Shu-hua², GE Xin²

(1. School of Energy and Power Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Engine Design and Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Shenyang 110015, China;

3. Aerospace Engine Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Beijing 100083, China)

Abstract: For coolant water path of turntable scoured by hot gas at combustor exit, two-dimensional and three-dimensional physical models of were established to simulate the flow and heat transfer process in internal path. The effect of inlet pressure and mass flow of coolant water on flow resistant and heat transfer performance was investigated. The results show that: (1) increasing inlet pressure of coolant water has little influence on wall temperature of turntable, and the wall temperature of structure 1 increases by 5 K and the wall temperature of structure 2 increases by 7 K when the inlet pressure of coolant water of turntable increases from 2.3×10^5 Pa to 8.3×10^5 Pa; (2) the wall temperature of structure 1 decreases about 120 K and the wall temperature of structure 2 decreases about 100 K when the inlet velocity of coolant water increases from 0.5 m/s to 5.3 m/s; the cooling effect is obvious; (3) shortening passage area of structure 2 will gain better heat transfer effect with the smaller mass flow of coolant water.

Key words: combustor; hot gas; turntable; flow field structure;
heat transfer performance

燃烧室出口温度场试验是航空发动机燃烧室性能试验的一项重要内容,以此来优化燃烧室的燃烧组织方式,以便为涡轮提供合理的进口边界条件^[1-4].目前,常用的有效温度测量方法是使用高温热电偶直接测量,要得到燃烧室出口截面的较准确的温度场,就需得到该截面足够密的测点温度,也就意味着要布置很多热电偶^[5-7].显然在测量区域布置过多的热电偶是很不现实的,一方面增加了试验成本和测试系统的复杂性,大大降低测试系统的可靠性;另一方面将堵塞流道,严重干扰流场.一种摆动测量机构巧妙地解决了这一问题.在环形燃烧室出口设置沿径向分布的5点热电偶耙,以对应高压涡轮叶片沿叶高方向的5个特征位置^[8-10].在燃烧室出口截面流场达到稳定状态后,摆盘按一定的角频率旋转,扫过整个区域得到截面温度场.在整个测量过程中,摆盘受高焓燃气冲刷,燃气总温高于1500 K,远超材料的承温极限,因此必须采用冷却结构才能保证其不会因温度过高而发生热变形甚至是烧毁,从而保证温度场测量的精确度和准确度.国外有采用气膜冷却的先例,而我国通常使用水冷却结构^[11-13].现有冷却结构在使用中发现局部易产生高温区,冷却效果不理想,并且高温区很容易烧裂、变形,发生漏水,使用寿命很低.针对这一情况,采用数值仿真计算,建立摆盘冷却水流场和固体壁面换热耦合计算模型.模拟摆盘冷却水工作过程,找到温度热点产生的位置和根源,并对冷却回路提出改进建议,改善表面温度,降低并消除温度热点.此方案已在实际中得到验证.

1 数值仿真方法和物理模型

选择应用于试验中的两种水冷却回路的摆盘作为研究对象进行建模和仿真,探讨内部流场和换热机理,以找出摆盘表面的热点分布与内部流场的相关性,对进一步改善表面温度场、降低并消除热点起到指导,达到延长摆盘使用寿命的目的.图1中结构1为早期应用的某传统摆盘,结构2是后期进行改进的新结构.

1.1 数值仿真方法

数值仿真采用二维和三维定常流动的 Navier-Stokes(N-S)方程来模拟换热器内不可压流动,同时将流动和固体区域边界热耦合计算,湍流模型采用标准 $k-\epsilon$ 模型,近壁面采用标准壁面函数处理,方程离散采用2阶迎风格式,采用SIM-

PLE(semi-implicit method for pressure linked equation)算法耦合压力和速度关系,选取合适的系数进行亚松弛迭代^[14].

1.2 物理模型

图1是两种摆盘的二维结构图,流线显示均采用内、外双回路设计.对于结构1,冷却水先进入内回路半周,由隔板进入外回路循环一周,同壳体进行热交换,之后由隔板进入内回路流出换热器.

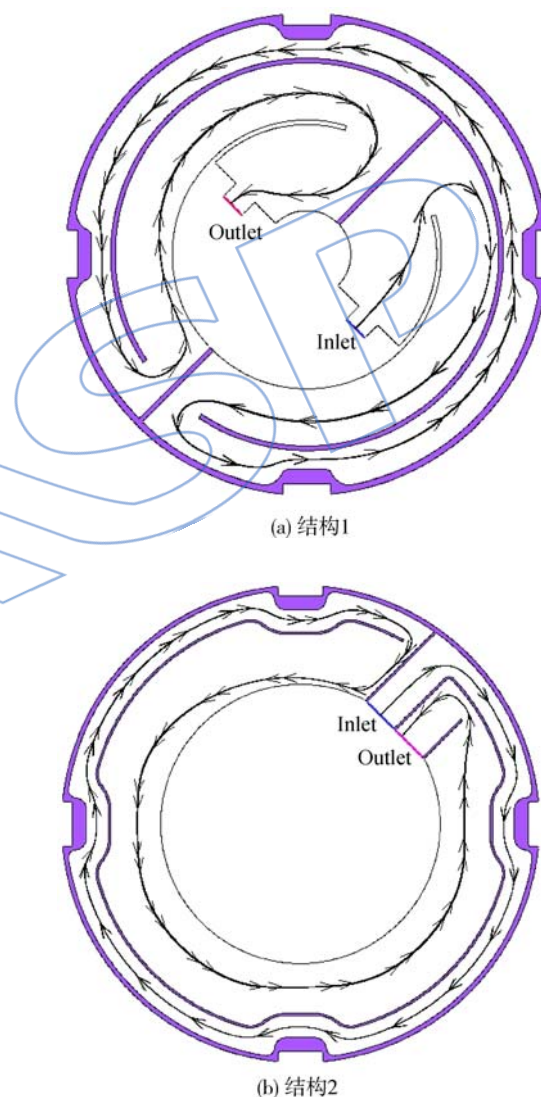


图1 摆盘二维结构图

Fig.1 Two-dimensional structure diagram of turntable

结构2较结构1有3处较大改进:①冷却水先进入外回路冷却受热壳体表面,循环1周完成换热后由隔板进入内回路循环1周流出换热器;②将外回路的通道横截面积缩小;③将4个热电偶安装座附近的渐缩、渐扩通道改为等截面通道.

图2是两种摆盘的三维结构图,内流道具有不对称性,并且周向均布的4个热电偶安装座,内有热电偶引出套管柱贯穿整个流路,阻塞流道部分区域,形成流场渐缩、渐扩结构,使流路更加复杂、流动更不均匀。图中具体几何尺寸省略。

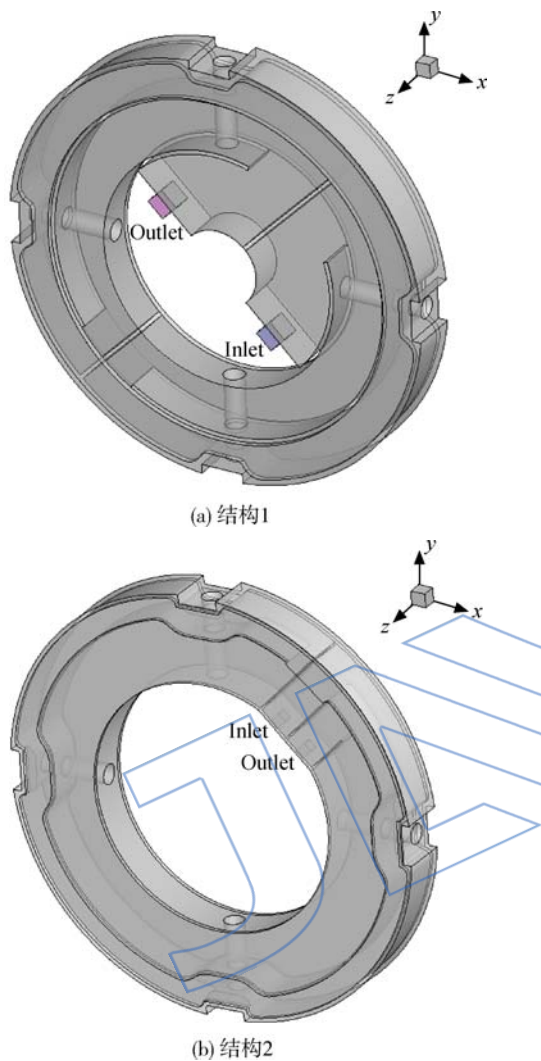


图2 摆盘三维结构图

Fig. 2 Three-dimensional structure diagram of turntable

1.3 边界条件

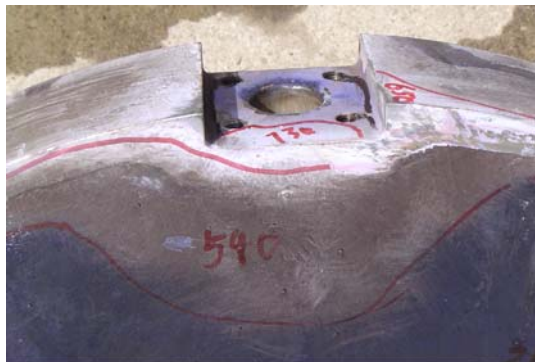
计算中冷却水进出口给定压力边界条件。摆盘周向外壁面和前、后盖板环面受燃烧室出口高温燃气冲刷的对流和辐射换热的复合影响,热环境非常恶劣、复杂,因此较合理地估算出此处边界条件是关键。首先做3点假设:①为了便于查表计算,燃烧室出口的高温燃气假定为标准烟气($\omega_{\text{CO}_2} = 0.13$; $\omega_{\text{H}_2\text{O}} = 0.11$; $\omega_{\text{N}_2} = 0.76$),外部边界使用对流和辐射换热叠加边界条件^[15-16];②从摆盘示温漆温度显示图上将摆盘外壁面和前盖板、后盖板部分受热面的平均温度取为 873 K;

③高温燃气外掠摆盘表面简化为流体外掠等温平板换热,可选用已有的换热经验公式。摆盘外壁面及外壳内表面假定为黑体辐射。根据相关对流换热准则关系式计算得到平均表面传热系数 $h_c = 210 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,气体在封闭空间同黑体表面的辐射换热关系式计算出的表面传热系数 $h_r = 90 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,则总表面传热系数 $h_t = h_c + h_r = 300 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。摆盘壳体及隔板同流体接触表面均为耦合边界,其余外壁面均取绝热壁面。

2 算例验证

采用前期试验中得到的传统摆盘结构1的示温漆显示的温度分布来验证数值模型和计算方法的正确性,对比如图3所示。试验中冷却水进口、出口压力分别为 4.3×10^5 , $3.2 \times 10^5 \text{ Pa}$,水温 T_{water} 为 298 K。

图3(a)中两幅照片是在受热表面均匀涂抹示温漆的结构1的表面温度分布,分别显示了四分之一周向外表面和安装座的温度场。图3(b)是在给定试验条件下,数值模拟出的表面温度场(T_s 为表面温度)。对比可看出,在安装座尖角附近出现明显的高温区,最高温度约为 973 K。在两安装座之间出现内、外环状分区,在靠近边缘的外环温度高,而在内环温度低,模拟从定量和定性上同试验结果吻合较好,这验证了本文数值方法的正确性。



(a) 结构1示温漆照片

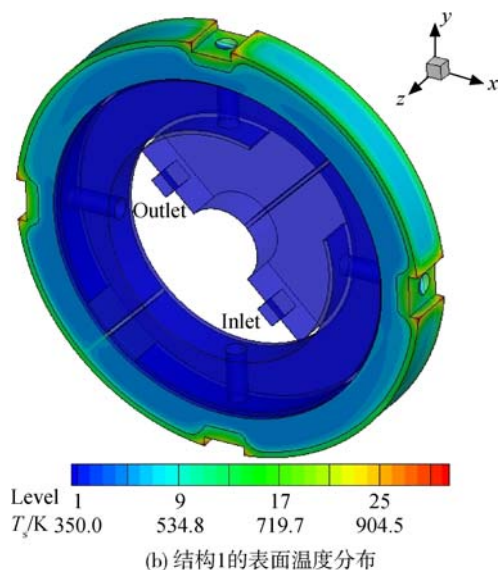


图3 数值仿真同试验结果的对比

Fig. 3 Comparison between numerical simulation and experiment diagram result

3 二维计算结果分析

3.1 两种结构摆盘流场比较

在冷却水进口压力为 4.3×10^5 Pa, 进出口压差为 1.1×10^5 Pa 工况下, 对比两种摆盘. 图4显示两种摆盘温度分布, 可以看出摆盘的外表面温度分布规律差别不大, 在周向表面温度分布均匀并且较低, 而在4个安装座的尖角处产生高温区, 且具有很大的温度梯度. 而在相同冷却水进口压力条件下, 结构2的最高表面温度相比结构1降

低将近 90 K, 说明结构2有利于换热.

从图5流线图(p_s 为腔内压力), 可以看到结构1的流体先从内回路进入换热器, 再进入外回路, 最后再进入内回路流出换热器, 其流场结构远比结构2的复杂. 在进口突扩及流动转向处会形成流动分离, 产生大的回流涡结构. 尤其在4个安装座处形成流动死区, 形成涡旋. 对于结构2, 主要产生2个大的回流涡: 一个是在外回路进入内回路的连接处, 此处流通面积缩小, 水流高速冲击到内环壁面并且流向改变 180° , 形成分离流; 另一个是在出口隔板位置由于流动转向 90° , 形成回流涡. 在4个安装座处, 相比结构1, 结构2的回流涡范围更小, 对此处的换热有一定的改善.

3.2 冷却水进口压力对换热效果的影响

保持冷却水在摆盘进出口压差为 1.1×10^5 Pa 不变, 提高冷却水进口压力, 考察换热效果的变化规律, 分别选取4个进口压力 p_{inlet} 为 2.3×10^5 , 4.3×10^5 , 6.3×10^5 , 8.3×10^5 Pa. 在计算中发现随着提高冷却水进口压力, 其流量会有小幅度的下降, 从 2.3×10^5 Pa 提高到 8.3×10^5 Pa, 流量会下降 5%, 对分析影响不大.

从温度云图中提取各工况的表面温度最高点数值(即表面热点温度) T_{max} , 以此做为判断冷却效果的准则, 如图6所示(p_0 为1个大气压, 约为 1.013×10^5 Pa).

可以看出两种摆盘的 T_{max} 均有小幅度上升, 随着提高冷却水进口压力, 摆盘的 T_{max} 稍有增大,

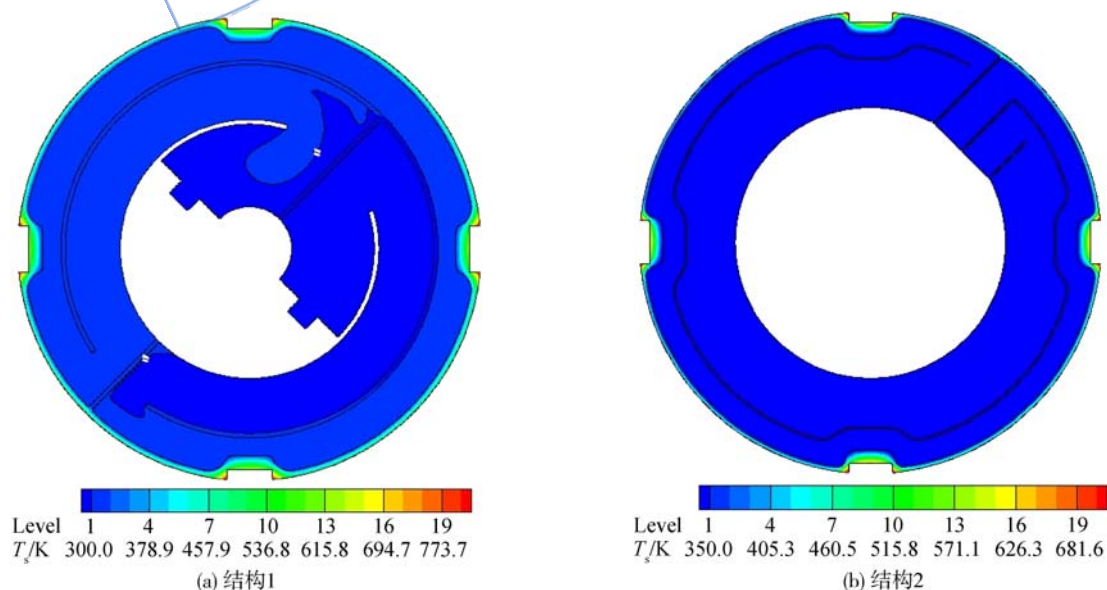


图4 温度等值线

Fig. 4 Temperature contours

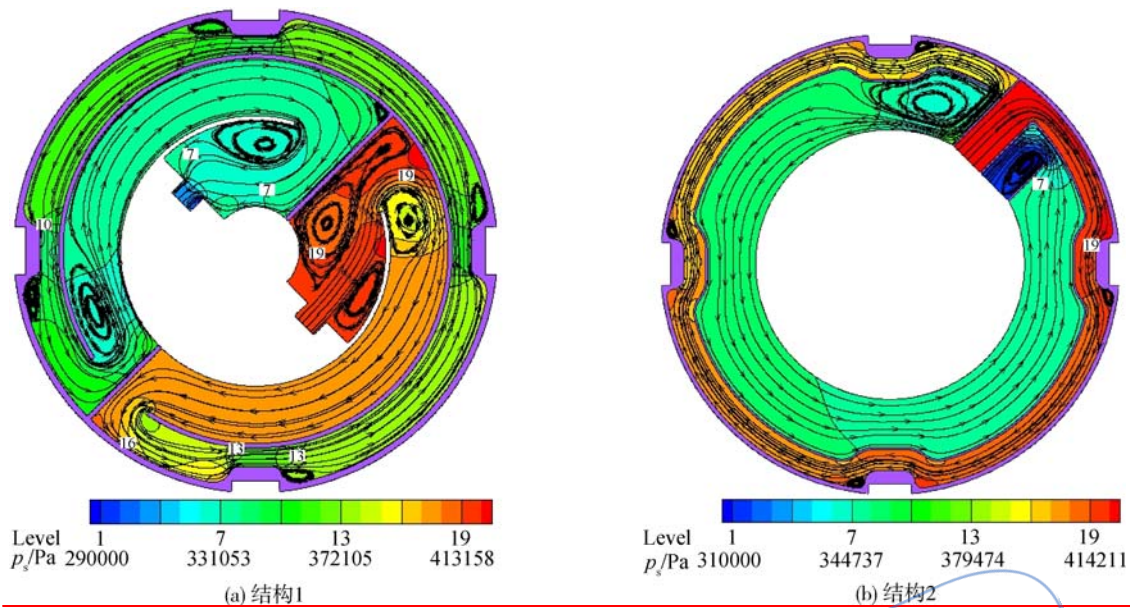


图5 压力等值线和流线

Fig. 5 Pressure contours and streamlines

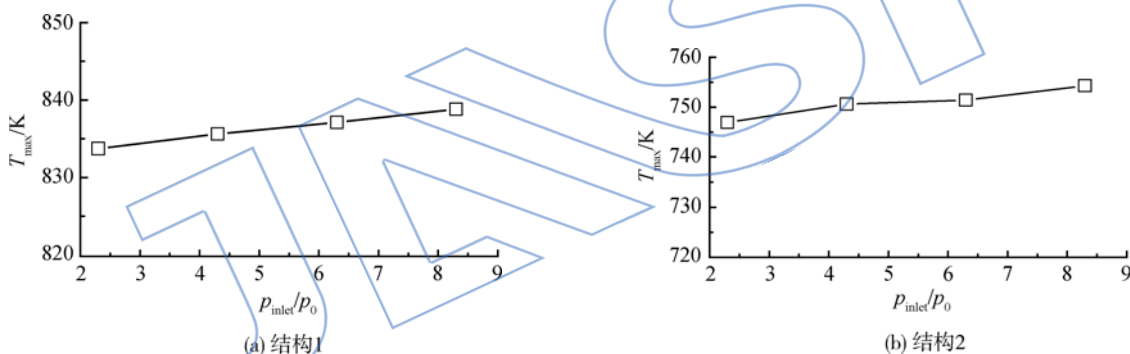


图6 进口压力对表面热点温度影响

Fig. 6 Influence of inlet pressure on surface hotspot temperature

进口压力从 2.3×10^5 Pa 增大到 8.3×10^5 Pa, 结构 1 的 $T_{\max}$ 升高了 5 K, 而结构 2 的 $T_{\max}$ 升高了 7 K. 分析这一较小的增量主要是由冷却水流量下降所导致, 所以得出冷却水进口压力对换热性能无影响.

从图 7 可以看出, 对于结构 1, 提高冷却水进口压力不会实质性改变流场基本结构, 只是提高进口压力后, 回流涡尺寸变小, 这主要是因为进口压力提高不容易形成逆压梯度, 阻止流动分离. 从图 8 也可看出这种规律, 内外回路连接处的涡旋区域有较明显地缩小.

3.3 冷却水流量对换热效果的影响

改变进口边界为速度边界条件, 增大速度则

可提高冷却水流量, 考察冷却水流量对换热效果的影响. 选取进口速度 U_{inlet} 为 0.5, 1, 1.5, 2, 2.4, 3.6, 5.3 m/s.

图 9 的两条曲线单调下降, 且下降速度逐渐趋于平缓, 这说明对于给定摆盘, 随着提高冷却水流量, 可以降低 $T_{\max}$. 这主要是由于提高进口速度即提高 Re , 可以增大表面传热系数; 而进口速度较大时改善效果放缓的原因是表面传热系数同 Re 是以分数幂相关的函数. 这说明在一定程度上提高加热表面的进口速度是增强换热的有效途径.

将不同冷却水流量的压力等值线进行比较如图 10 和图 11 所示, 提高冷却水流量, 流场的压力分布和回流涡结构并没有本质的变化.

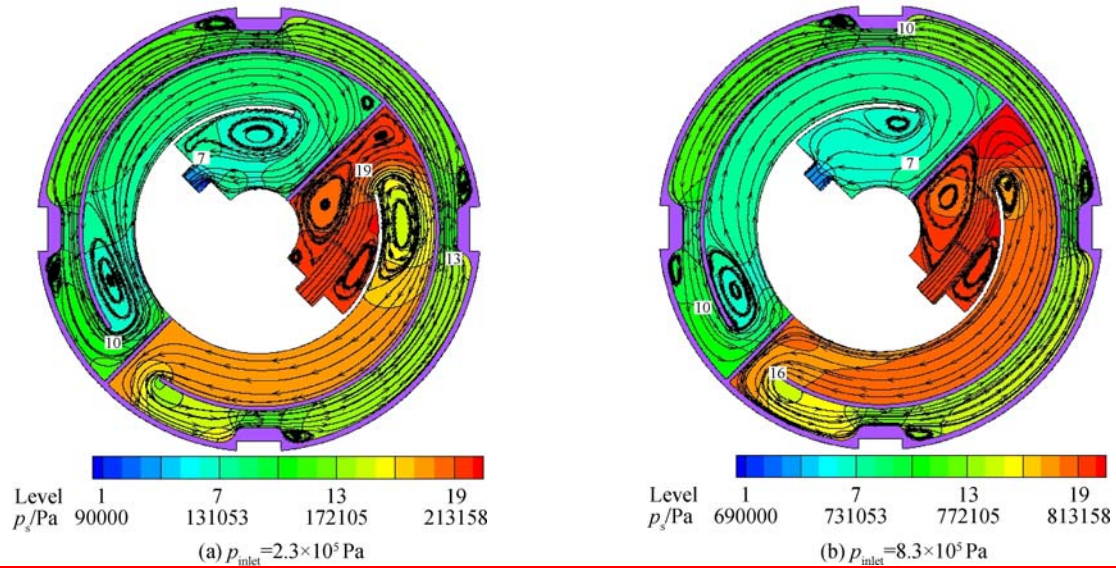


图 7 不同进口压力下的压力等值线和流线 (结构 1)

Fig. 7 Pressure contours and streamlines with different inlet pressures (structure 1)

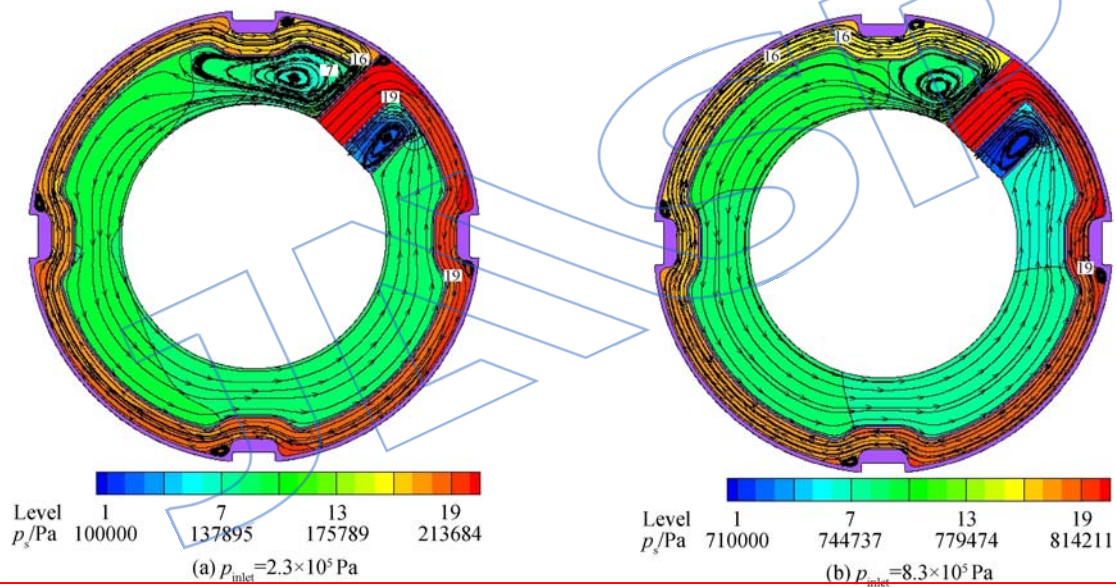


图 8 不同进口压力下的压力等值线和流线 (结构 2)

Fig. 8 Pressure contours and streamlines with different inlet pressures (structure 2)

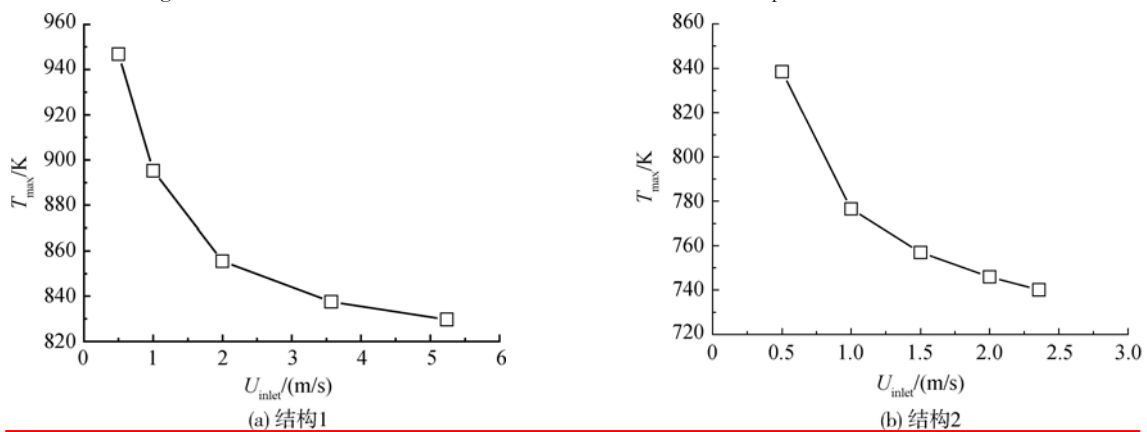


图 9 表面热点温度随进口速度变化

Fig. 9 Surface hotspot temperature vs. inlet velocity

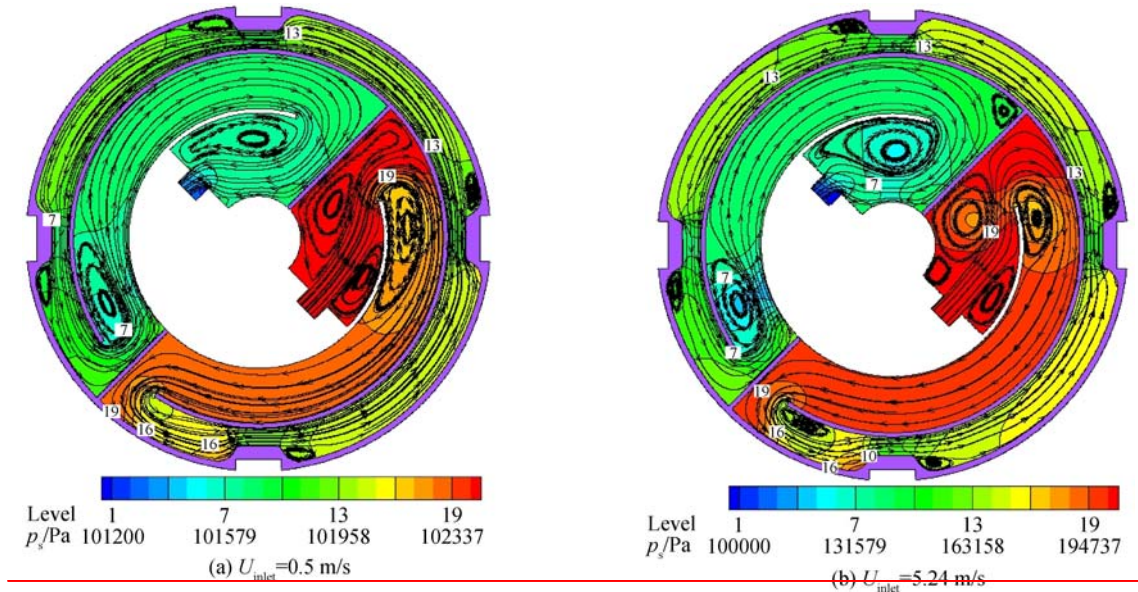


图 10 不同进口速度的压力等值线和流线 (结构 1)

Fig. 10 Pressure contours and streamlines with different inlet velocities (structure 1)

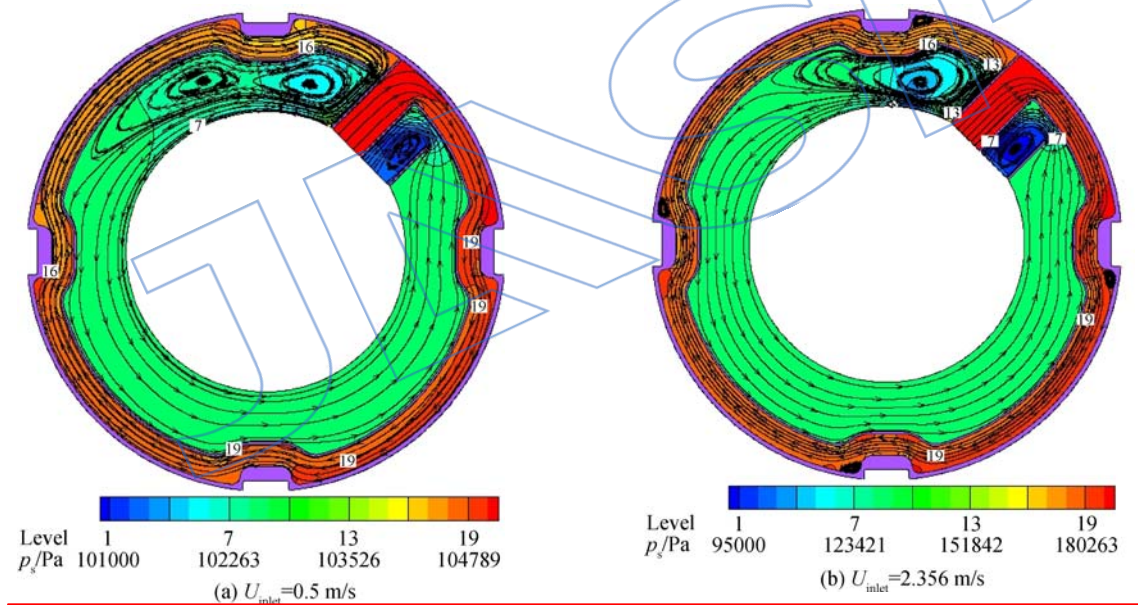


图 11 不同进口速度的压力等值线和流线 (结构 2)

Fig. 11 Pressure contours and streamlines with different inlet velocities (structure 2)

4 三维流场数值模拟

摆盘三维计算取一次试验中测得的实际工况, 冷却水进、出口压力分别为 4.3×10^5 、 3.2×10^5 Pa, 换热器压差为 1.1×10^5 Pa, 以还原摆盘真实情况. 接着分别从换热和流阻性能两方面分析.

4.1 摆盘换热性能

图 12 所示为两种摆盘外表面温度等值线, 具有 3 点相同的变化规律: ①面面交接处温度高, 平

壁温度低; ②安装座附近温度高, 尤其是 4 个尖角位置, 如图 13 所示, 这说明在几何曲率较大的地方更容易发生热应力集中; ③从图 14 看出, 周向外表面温度呈现 O 型环状分布, 外圈温度高, 中间区域温度低. 尤其对于结构 2, 在进口正对的外表面处出现了温度更低的椭圆状区域, 这主要是冷却水进入外回路首先冲击该位置, 强化了此处的对流换热效果.

图 15 是垂直轴截面的剖面温度等值线. 可以

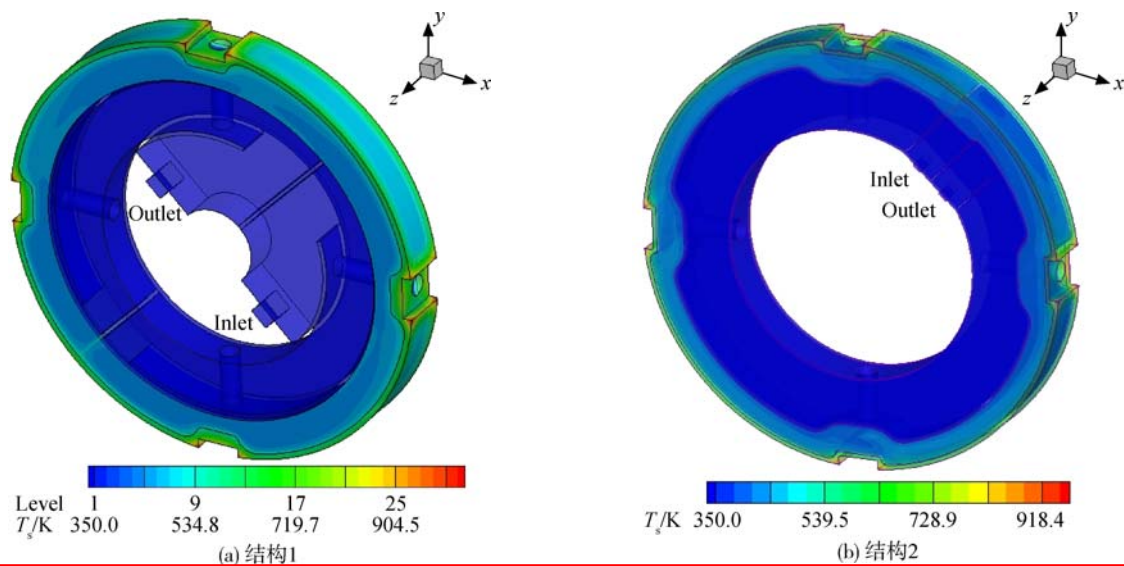


图 12 外表面温度等值线

Fig. 12 Temperature contours of surface

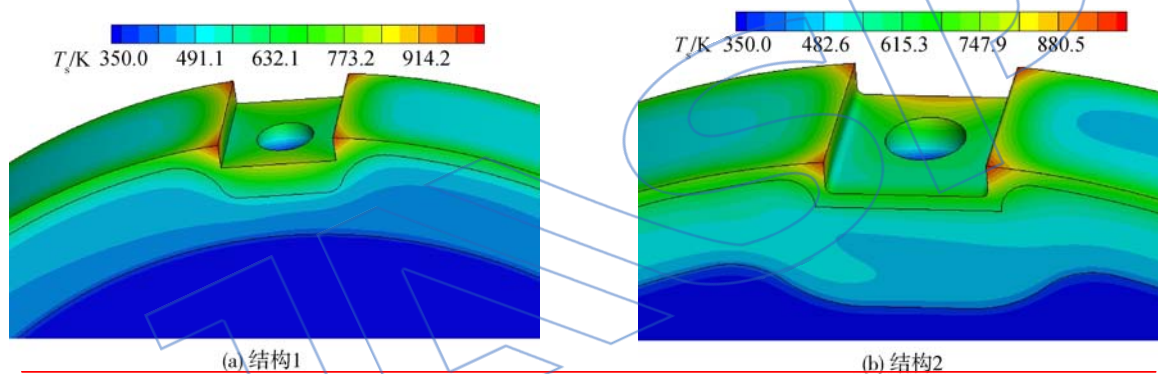


图 13 外表面局部温度等值线

Fig. 13 Local temperature contours of surface

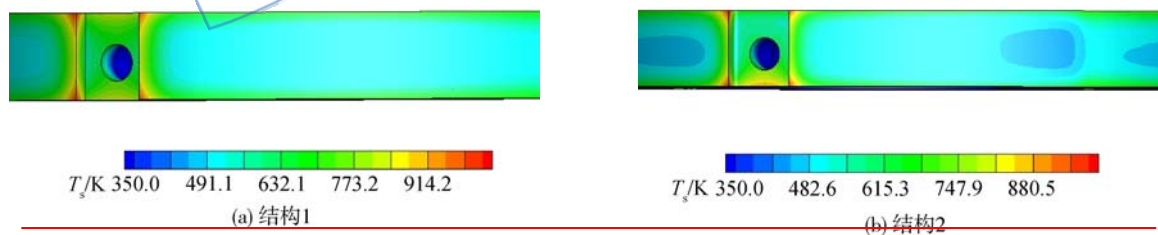


图 14 安装座局部温度等值线

Fig. 14 Local temperature contours of mounting base

看出热量沿着壳体从外向内传导,并不断被冷却水带走,在出口处水温有一定的上升,计算得到结构 1 的冷却水流量为 4.78 kg/s ,而其出口水温平均上升了 4.9 K ,而结构 2 的冷却水流量为 2.1 kg/s ,出口水温平均上升了 11.8 K ,可以看到只有在贴近外环面和前后盖板的加热壁面的薄层内水温存在梯度,而其他区域仍然保持为低温区,这说明大量冷却水的换热能力没有得到利用。

4.2 摆盘流阻性能

从图 16 可以看出,摆盘内的流场呈现出很明显的三维特征,流线相互交错,尤其是在回流区,涡旋结构呈现出沿摆盘轴线方向螺旋形状,并且受安装座和套管的影响,此处流线更为复杂,低速涡旋使此处少量水聚集,恶化换热。

再取垂直轴线的两个剖面对三维流场的压力变化进行分析,图 17 可以看到同二维模型的压力

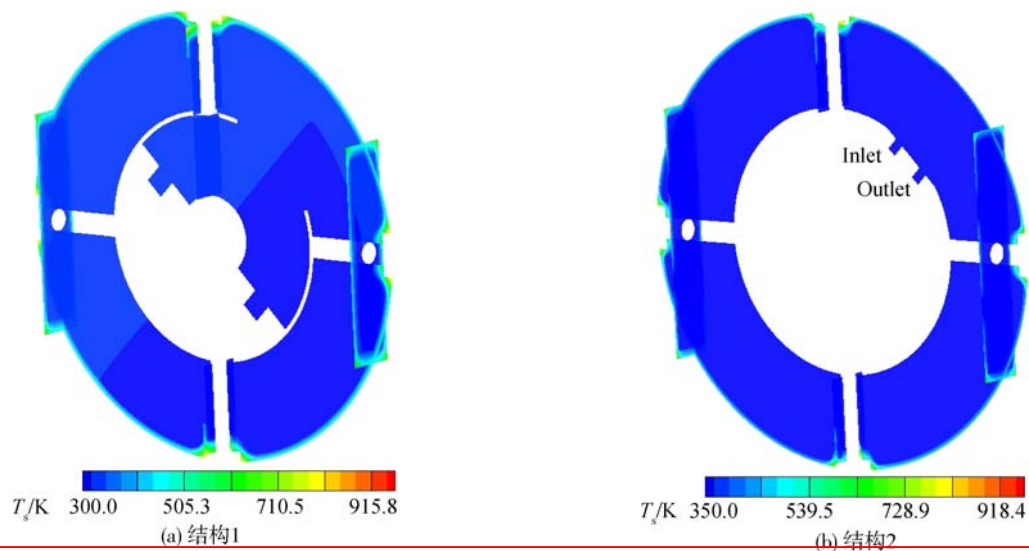


图 15 剖面温度等值线

Fig. 15 Temperature contours of section

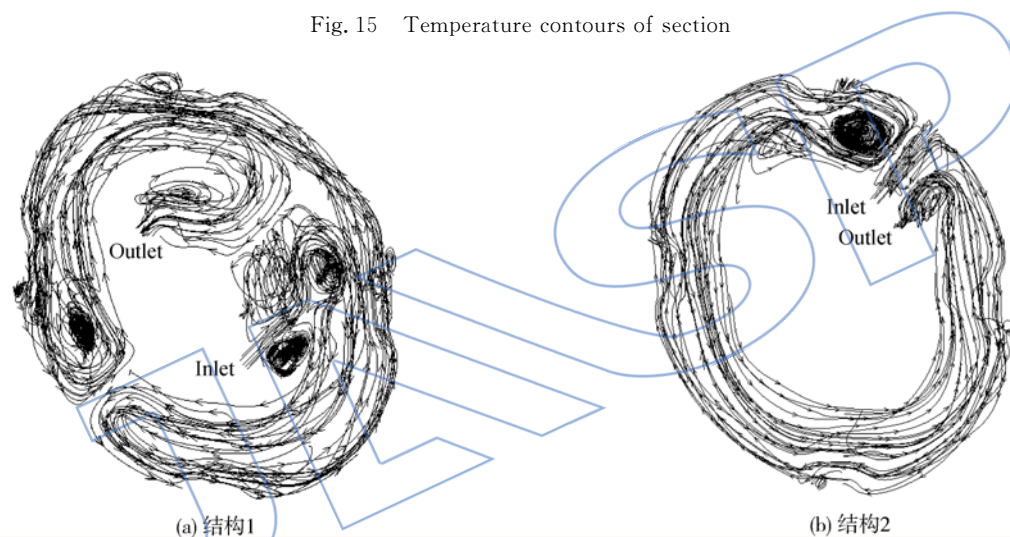


图 16 三维流线

Fig. 16 Three-dimensional streamlines

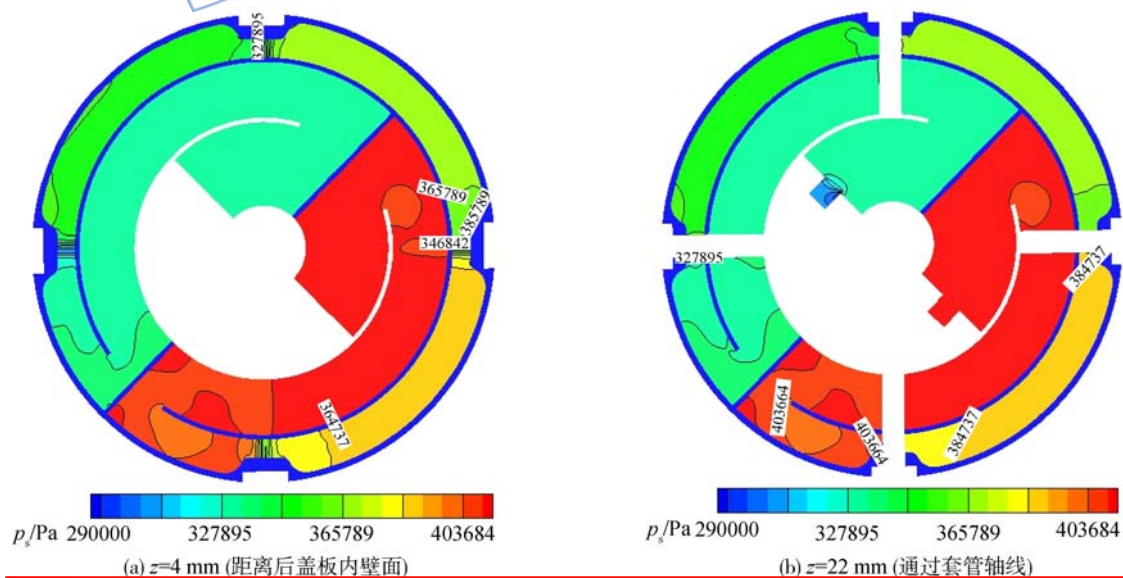


图 17 剖面压力等值线 (结构 1)

Fig. 17 Pressure contours of section (structure 1)

等值线基本类似,在安装座处流道最窄,压力梯度变化很大,产生较大的局部阻力损失。

对于结构2,其三维剖面图和二维模型计算的的压力场结构变化较大,在其摆盘内压力保持较高的数值,如图18所示。

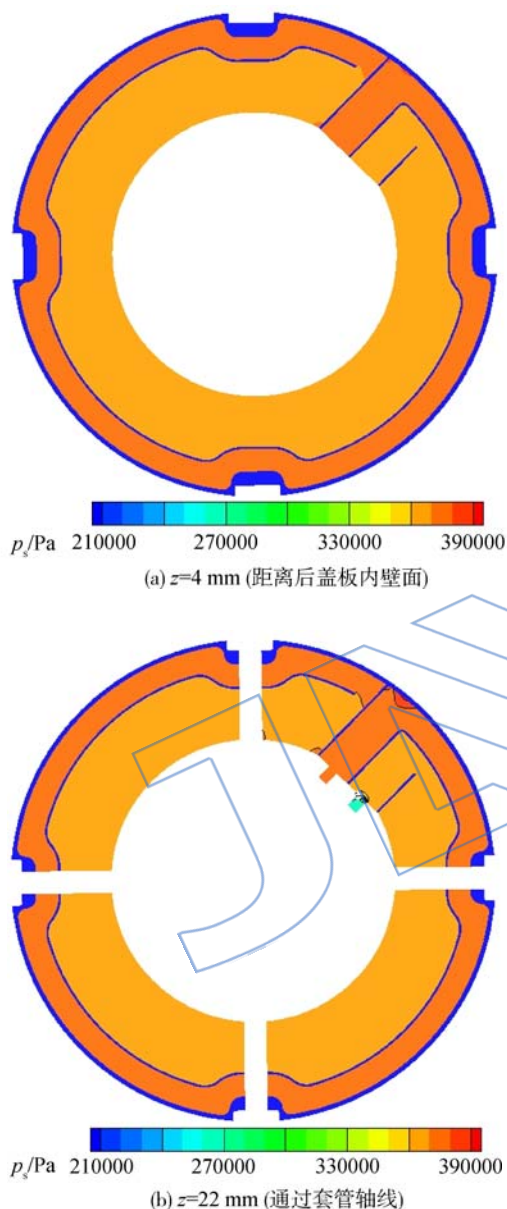


图18 剖面压力等值线(结构2)

Fig. 18 Pressure contours of section (structure 2)

5 结论

通过建立二维、三维摆盘模型,数值模拟了冷却水在内部通道的流动与换热过程,可以得到以下几点结论:

提高摆盘内冷却水的压力对流场结构没有本质影响,换热性能不会随压力增加而改善。

对给定换热器,提高冷却水流量将增强换热性能,但随着流量的增大,这种效果逐渐消失。

传统摆盘(结构1)的流道沿径向过高,只是在贴近换热面的薄层内冷却水参与换热,而其余水的冷却能力未被利用,所以降低流道高度、缩小流道流通面积是优化的方向。

新摆盘(结构2)在传统结构基础上缩小流道的流通面积,在更小的冷却水流量的工况下得到更好的换热效果。

后续工作将以计算结果为指导,以改善局部换热为目标,探讨并设计两种摆盘结构方案,建立模型并且仿真计算验证效果。

参考文献:

- [1] 彭建,白雪. 航空发动机燃烧室温度测量[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2000, 13(2): 50-52.
- [2] 左渝钰. 航空发动机高温应变测量系统[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1528-1529.
ZUO Yuyu. Strain measuring system depending on high temperature of aero-engine[J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(11): 1528-1529. (in Chinese)
- [3] 丁国玉,何小民,金义,等. 主燃区出口特征影响出口温度场性能的数值研究[J]. 航空发动机, 2012, 38(4): 17-21.
DING Guoyu, HE Xiaomin, JIN Yi, et al. Influence of primary zone outlet feature on combustor outlet temperature field[J]. Aeroengine, 2012, 38(4): 17-21. (in Chinese)
- [4] 富丽新,张宝诚,赵春伟. 航空发动机燃烧室和涡轮出口滞止温度相关的研究[J]. 航空动力学报, 1996, 11(2): 202-204.
FU Lixin, ZHANG Baocheng, ZHAO Chunwei. Relationship of turbine-outlet temperature to combustor-outlet temperature in aeroengine[J]. Journal of Aerospace Power, 1996, 11(2): 202-204. (in Chinese)
- [5] 杨志民,孙永飞,赵煜,等. 航空发动机燃烧室出口温度场双向测量方法[J]. 航空发动机, 2010, 36(1): 41-44.
YANG Zhimin, SUN Yongfei, ZHAO Yu, et al. Bi-directional measurement method of combustor outlet temperature field for aero-engine[J]. Aeroengine, 2010, 36(1): 41-44. (in Chinese)
- [6] 徐榕,程明,赵坚行,等. 斜切径向旋流器环形燃烧室数值模拟[J]. 航空发动机, 2010, 36(2): 45-49.
XU Rong, CHENG Ming, ZHAO Jianxing, et al. Numerical study of an annular gas combustor with swirl cup[J]. Aeroengine, 2010, 36(2): 45-49. (in Chinese)
- [7] 吴超,徐让书,蒲宁,等. 某型航空发动机燃烧室出口温度场数值模拟[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2009, 26(2): 1-4.
WU Chao, XU Rangshu, PU Ning, et al. Numerical simulation of an aero-engine combustor exit temperature field[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2009, 26(2): 1-4. (in Chinese)
- [8] 虞跨海,王金生,杨茜,等. 回流式冷却叶片流热耦合数值

- 分析[J]. 热能动力工程, 2011, 26(3): 271-274.
- YU Kuahai, WANG Jinsheng, YANG Xi, et al. Numerical simulation of the fluid/heat coupling in return flow type cooling blades[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2011, 26(3): 271-274. (in Chinese)
- [9] 王利平, 张靖周, 姚玉. 敷设热障涂层气冷叶片温度分布数值研究[J]. 航空动力学报, 2012, 27(2): 357-364.
- WANG Liping, ZHANG Jingzhou, YAO Yu. Numerical investigation on temperature distribution of an air-cooled and thermal barrier coating blade [J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(2): 357-364. (in Chinese)
- [10] 吉倩, 赵晨光, 张宝诚, 等. 航空发动机燃烧室过渡态温度场数值研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2010, 27(2): 24-28.
- JI Qian, ZHAO Chenguang, ZHANG Baocheng, et al. Numerical simulation of the temperature field in transition condition of an aero-engine combustor[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2010, 27(2): 24-28. (in Chinese)
- [11] 宋少雷, 李铜桥, 李金英. 有气膜孔燃气轮机燃烧室燃烧流场的数值模拟[J]. 热能动力工程, 2010, 25(3): 269-272.
- SONG Shaolei, LI Tongqiao, LI Jinying. Numerical calculation of the combustion flow field in a gas turbine combustor with air-film holes [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2010, 25(3): 269-272. (in Chinese)
- [12] 尹洪, 王文萍, 任静, 等. 燃烧室出口辐射对气膜冷却传热影响研究[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(2): 214-217.
- YIN Hong, WANG Wenping, REN Jing, et al. Research on the effect of combustor outlet radiation on the film cooling heat transfer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(2): 214-217. (in Chinese)
- [13] 乔娟, 张宝诚, 吕文菊, 等. 航空发动机燃烧室火焰筒掺混区特性的研究[J]. 沈阳航空工业学院学报, 2007, 24(3): 1-4.
- QIAO Juan, ZHANG Baocheng, LÜ Wenju, et al. Dilution-zone characteristics of an aero-engine combustor flame tube[J]. Journal of Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, 2007, 24(3): 1-4. (in Chinese)
- [14] 何跃龙, 邓远灏, 颜应文, 等. 大涡模拟模型燃烧室燃烧性能计算[J]. 航空动力学报, 2012, 27(9): 1939-1947.
- HE Yuelong, DENG Yuanhao, YAN Yingwen, et al. Large-eddy simulation of two-phase reacting flows and combustion performance in model combustor[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(9): 1939-1947. (in Chinese)
- [15] 徐丽, 孙丽艳. 某型燃气轮机燃烧室性能数值模拟[J]. 汽轮机技术, 2012, 54(2): 117-119.
- XU Li, SUN Liyan. Numerical simulation of combustor performance of gas turbine[J]. Turbine Technology, 2012, 54(2): 117-119. (in Chinese)
- [16] 周昆原, 罗翔, 徐国强. 旋转诱导燃气入侵的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2011, 26(12): 2704-2709.
- ZHOU Kunyuan, LUO Xiang, XU Guoqiang. Numerical simulation of rotationally-induced ingress through turbine rim seals[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(12): 2704-2709. (in Chinese)